

2열 외부가압 공기 저어널 베어링에서 급기구 위치에 따른 동적계수에 관한 실험적 연구

이종렬[†] · 이준석 · 성승학* · 이득우*[‡]

부산대학교 대학원, *부산대학교 기계공학부

An Experimental Study on the Dynamic Coefficients According to the Source Positions in Externally Pressurized Air-lubricated Journal Bearing with Two Row Sources

Jong-Ryul Lee[†], Jun-Seok Lee, Sueng-Hak Soeng* and Deug-Woo Lee*[‡]

Graduate School, Pusan National University

*Department of Mechanical Engineering, Pusan National University

Abstract – This paper has been presented the hydrodynamic effect by the journal speed, eccentricity and source positions in order to overcome the defects of air bearing such as low stiffness and damping coefficient. Choosing the two row source position of air bearing is different from existed investigations in the side of pressure distribution of air film because of the high speed of journal and the wedge effects by the eccentricity. These optimal chooses of the two row source positions enable us to improve the performance of the film reaction force and loading force as making the high speed spindle. In this paper, The pressure behavior in theory of air film according to the eccentricity of journal and the source positions analyzed. The theoretical analysis have been identified by experiments. The results of investigated characteristics may be applied to precision devices like ultra-precision grinding machine and ultra high speed milling.

Key words – hydrodynamic effect, two row source positions, wedge effects, film reaction force, loading force.

1. 서 론

공기베어링은 공기를 윤활제로 쓰므로 마찰이 적어 고속 기계에 적합하고, 평균화 효과에 의해 매끄럽게 회전하므로 회전 정밀도가 높아 초정밀 공작 기계와 고정밀 측정기에 적합하다. 이러한 공기 베어링은 그 응용을 위하여 성능을 정확히 파악할 필요성이 대두되고 있다. 공기 베어링의 특성 중 부하지지 능력, 강성 및 감쇠계수는 베어링의 성능을 대표하는 특성치로서, 베어링의 설계시 강성 및 감쇠계수를 최대의 고려대상을 삼고 있기 때문에 이러한 계수의 측정을 필수적으로 수

행되어야 한다.

고속 회전체 적용을 위한 공기 베어링의 성능을 파악하기 위하여 다각적인 방법[2-11]들이 시도되어 왔으나, 이들 연구는 외부가압형 정압상태라는 단일 급기공 혹은 2열 급기공에 대한 이론 분석 및 실험에 준하여 왔다. 특히 2열 급기공의 경우 급기공의 위치선정은 베어링 양 끝단으로부터 베어링 전체길이의 1/4위치 선정에 준하여 강성에 관한 이론적 분석 및 압력 및 속도 변화에 의한 실험적 분석을 수행하여 왔다[1-11].

지금현재 세계적인 공기정압주축 판매회사인 Westwind Turbines Ltd.의 Poole과 J.W.Powell이 발표한 문헌[1]에 Fig. 1과 같이 잘 표현이 되어 있다. 그러나 외부가압형 공기정압 베어링에서 저어널과 베어링의 간극(Clearance)이 10~20 μm 로 설계되어짐으로 좁은 간극

[†]주저자 : jr4165@hanmail.net

[‡]책임저자 : dwoolee@hyowon.pusan.ac.kr

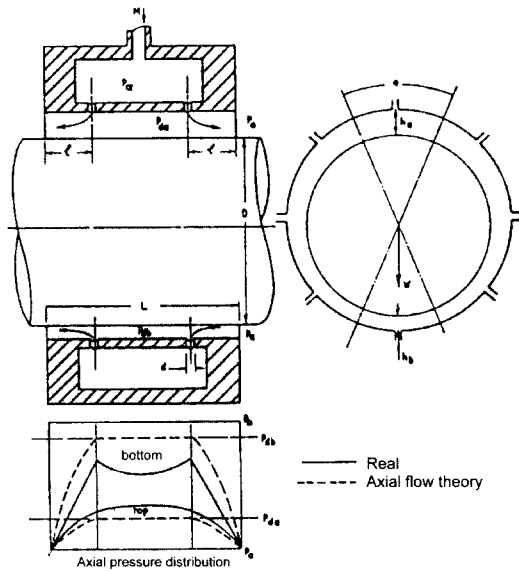


Fig. 1. A pressure of journal bearing.

의 유막은 고속의 영역으로 운전할 경우 하이드로 다이나믹 현상(Hydrodynamic effect)이 존재할 수 있음을 충분히 고려하여야 할 것으로 사료되어진다.

본 연구에서는 선행연구[13]에서 외부가압형 정압베어링에서 저어널의 운전이 고속 경우 발생하는 HRD 현상(Hydrodynamic effects)의 영향으로 공기저어널 베어링 압력분포가 달라지며, 이와같은 압력변화는 베어링의 부하지능력이 공기급기구의 위치에 따라 변할 수 있다는 결론을 제시하였으며, 이러한 결과를 비교 분석하기 위하여 2차원 절삭을 통하여 X 방향의 힘과 Y 방향의 힘을 동시에 획득함으로써 이론적인 결론을 실험적으로 분석하고자 한다. 따라서 Fig. 2와 같이 2열 급기구 공기정압베어링에서 노즐 위치 선정 설계가 고려되어야 하며, 이는 편심량 및 저어널의 회전속도의 증가에 따라 베어링 압력이 변화에 의한 베어링

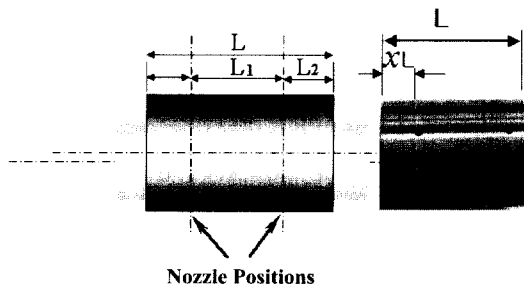


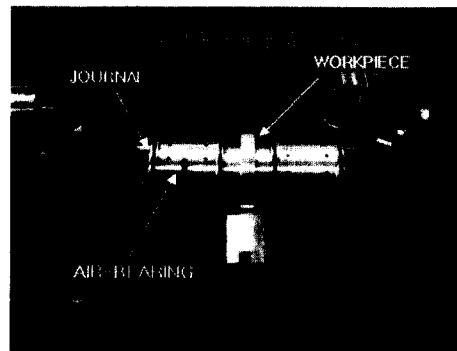
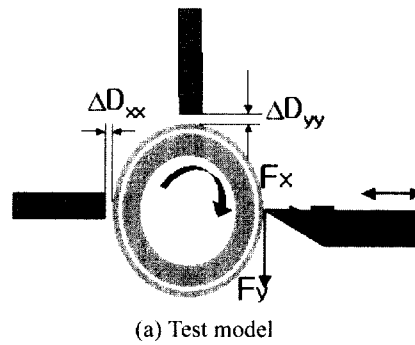
Fig. 2. Design parameters for the bearing length.

성능을 실험적으로 분석하고자 한다.

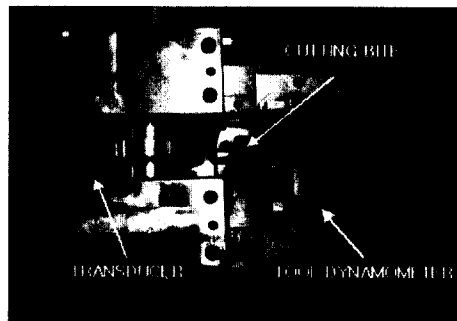
2. 실험장치 구성 및 내용

2-1. 본 연구의 실험 개념

공기 베어링의 동적 강성 및 감쇠계수를 측정하기 위하여 Fleming[2]을 대표하여 불평형 질량을 이용한 가진방법, 저어널의 회전시 한쪽방향으로 힘을 가해줌으로써 저어널의 부하 가진방법 등 여러 가지[3-8] 실험적 방법을 제시하여 왔다. 그러나 이들 실험모두 베



(b) Configuration of journal and air-bearing



(c) Test apparatus

Fig. 3. Photograph of the experimental concept.

어링의 간극이 크며, 제어널 혹은 베어링부의 가진을 위한 장치 및 그와 같은 가진 장치 등을 설치하기 위하여 설계상에 고려해야 할 사항이 많아 신뢰할 수 있는 실제 적용 데이터를 얻는데에는 한계가 있어 왔다.

본 연구에서는 Fig. 3와 같이 제어널의 고속주행이 가능하도록 시스템을 구성하였으며, 고속운전시 2차원 절삭을 행함으로써 공구동력계를 이용하여 X 방향의 힘과 Y 방향의 힘을 동시에 획득 할 수 있도록 장치를 구성하였다. 절삭이 행해질 때 5 nm 분해능을 가진 용량형 정밀 변위센서를 이용하여 절삭저항에 의한 절삭 부하량에 따른 X 방향의 변위와 Y 방향의 변위를 절삭이 행해질 때 모두 4개의 신호를 획득함으로써 실제적으로 베어링에 작용하고 있는 절삭저항에 의한 부하력과 변위신호를 분석하여 베어링의 동적계수를 측정 할 수 있으리라 사료되어진다.

2-2. 동적계수 측정을 위한 실험내용의 타당성

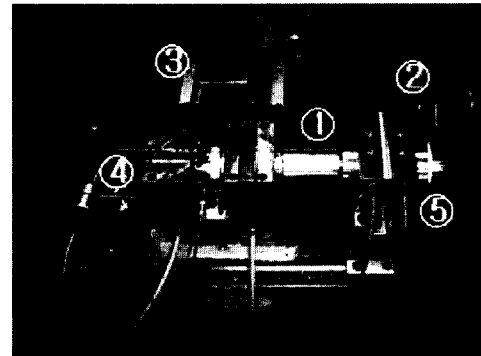
본 연구의 실험장치 구성은 동적계수를 측정하는데 있어서 다음과 같은 두 가지 신뢰할 수 있는 타당성을 제시 할 수 있다.

첫번째는 동적계수에 관한[6] 실험 방법중의 하나로서 회전체 제어널에 불평형 질량을 부착하여 회전속도를 변화시켜감에 따라 불평형 질량에 의해 발생하는 휠(Whirl)의 변위신호를 측정하였고, 그때 발생하는 회전운동량을 계산하여 동적계수를 계산하여 경향을 분석하였다. 그러나 이러한 방법에는 불평형 질량에 의한 변위신호에는 불평형 질량에 의한 변수 뿐만 아니라 여러 변수들을 포함하고 있어 실제 정확한 부하가 진력과 정확한 가진위치를 측정하기에 많은 어려움이 있으며, 신뢰성에 한계가 있다고 할 수 있다. 그러나 Fig. 3과 같은 실험장치 구성은 절삭공구가 제어널에 부착하여 실제 피삭재에 절삭행함으로써 제어널의 회전 불안정시 발생하는 휠(Whirl)발생을 억제시킴으로써 제어널을 고정시켜주고 제어널의 정확한 변위신호를 획득할 수 있다. 이는 베어링의 간극내에서 발생하는 베어링의 압력분포에 따른 베어링 하중지지능력의 변화를 좀더 정확하게 찾을 수 있는 점으로 분석하고 있다.

두 번째로 지금까지 가진하는 방법에 있어 주강성 방향에 관한 강성을 측정[2,8,9]해온 것 대부분이라 할 수 있다. 본 연구에서는 고속회전시 절삭이 행해질 때 발생하는 절삭저항을 베어링의 가진력으로 측정함으로써 공구동력계로부터 X 방향과 Y 방향 두방

Table 1. Experimental conditions

실험조건	수치
베어링의 직경	50 mm
공기 공급압	6 kg/cm ²
베어링의 진원도	0.45 μm
베어링의 원통도	1.25 μm
제어널의 진원도	0.5 μm
제어널의 회전속도	10,000/20,000 rpm



① Magnetic coupling ② Transducer sensor
③ AC spindle motor ④ Sub-air spindle
⑤ Dynamometer



⑥ Transducer amplifier
⑦ Digital oscilloscope
⑧ Charge amplifier

Fig. 4. Experimental set-up.

향 베어링에 가진하는 힘을 동시에 측정이 가능하므로 고속영역에서의 주강성(K_{xx} , K_{yy}) 방향의 베어링의 동적계수를 좀더 정확히 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 연구의 실험 조건은 다음 Table 1에서 나타내었다.

2.3. 실험장치 구성

본 연구에서 사용된 실험장치 Fig. 4은 절삭력을 지속적으로 유지하기 위한 고풍력(1 HP) 전동 모터(②번)를 장착하고, 전동 모터 회전시 모터자체로 부터의 진동과 벨트에 의한 진동이 실험 제어널에 전달 되지 않게 하기 위하여 공기 정압 스피들(⑤번)과 마그네틱 커플링(Magnetic coupling)(①번)을 연결 시켜 제어널의 고속 회전을 할 수 있도록 구성하였다.

고속의 회전속도는 전동모터부의 풀리와 공기정압스피들의 풀리의 직경을 조절함으로써 제어널의 속도를 맞추었고, 제어널의 진원도 오차는 0.4 μm 정도였으며, 원통도는 약 1.25 μm 이내로 제작하였다. 중앙부에 피삭재(AI7075)를 부착하여 2차원 절삭가공이 행해지기 위해 절단 바이트를 이용하여 제어널의 반경방향으로 피삭재의 절입을 줌으로써 절삭저항이 발생하도록 하였다.

본 실험에서 사용한 변위 측정 센서는 분해능 5 nm 인 용량형 변위 센서를 이용하였으며, 공구동력계는 Kistler사에서 제작한 9257B를 이용하였다. 변위 측정 센서와 공구동력계에서 나온 신호들은 증폭이 되어 LeCroy사의 4채널 디지털 오실로스코프에 2방향의 변위신호와 2방향의 절삭력 신호가 동시에 획득이 되어 저장되도록 하였다. 본 연구의 실험장치는 AC 서보모터를 10 mm/min~20 mm/min으로 이송하게 하여 절단 바이트가 공작물에 천천히 절입이 되도록 제어하였으며, 회전 축의 속도가 정상상태에 도달한 뒤 실험을 할 수 있게 하기 위해 회전 개시 후 10분간 공회전을 한 후에 스피들의 회전속도가 DmN 500,000과 DmN 1,000,000에 도달하였을 때 절삭을 행하여 절삭력과 변위신호를 동시에 획득하였다. 이와 같은 실험은 베어링의 급기구 위치를 달리하여 각각의 베어링에 대해서 반복실험을 하였다. 각 센서들로부터 오는 신호는 오실로스코프에 입력하여 임시로 저장되도록 한 후에 RS232를 통해 컴퓨터로 전송되도록 장치를 구성하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 공구 동력계를 이용하여 피삭재 회전 방향의 절삭력과 절입방향의 절삭력을 획득하였으며 절삭시 절삭력에 의해 발생하는 축의 미소 변형을 변위 센서를 이용하여 변위량의 신호를 분석하였다.

Fig. 5은 4채널 디지털 오실로스코프를 이용하여 공구 동력계의 절삭력과 변위 신호를 동시에 획득한 신

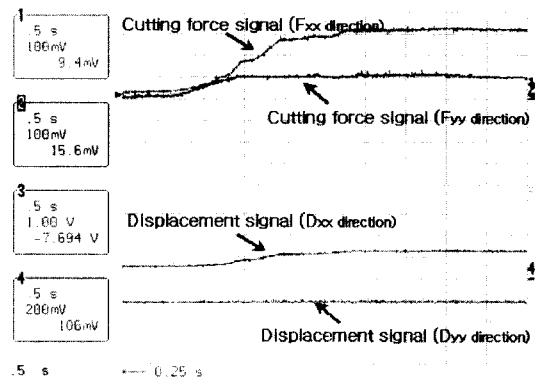


Fig. 5. The cutting force and gab signals.

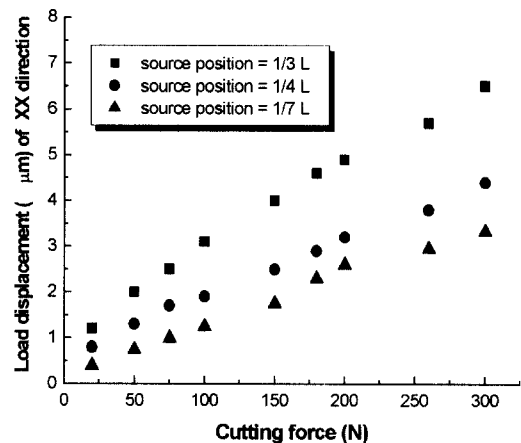


Fig. 6. The characteristics between loading capacity and loading displacements of K_{xx} direction.

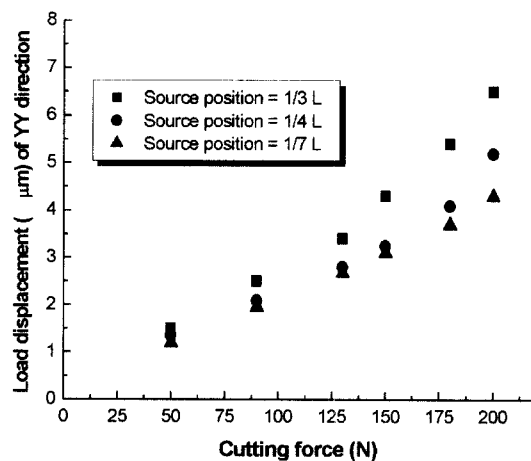
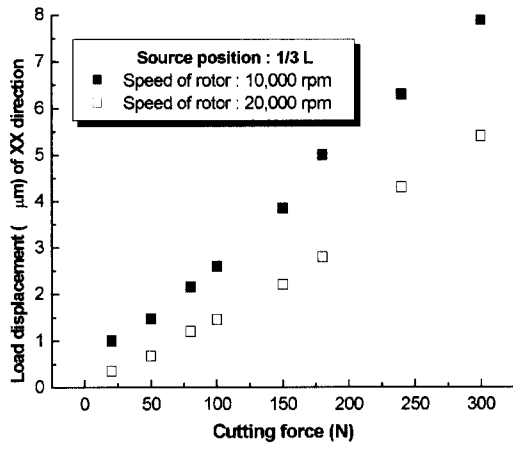
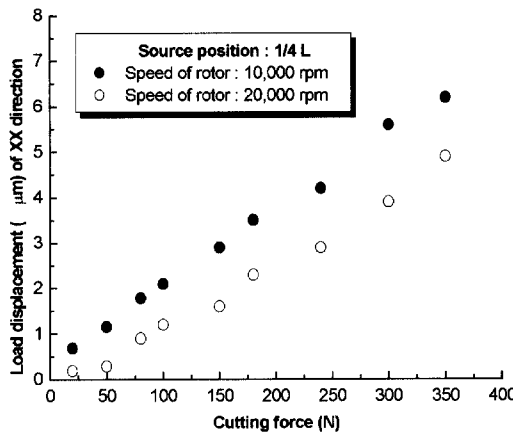


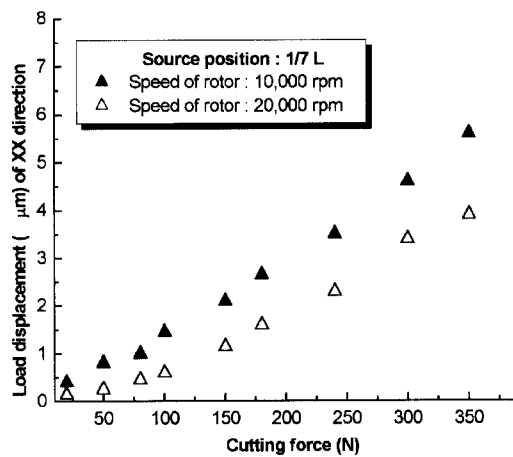
Fig. 7. The characteristics between loading capacity and loading displacements of K_{yy} direction.



(a) Source position=1/3L



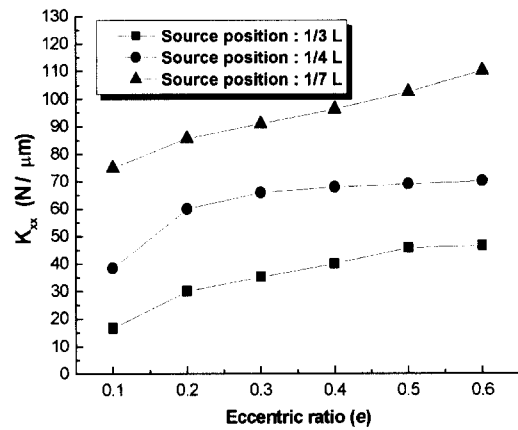
(b) Source position=1/4L



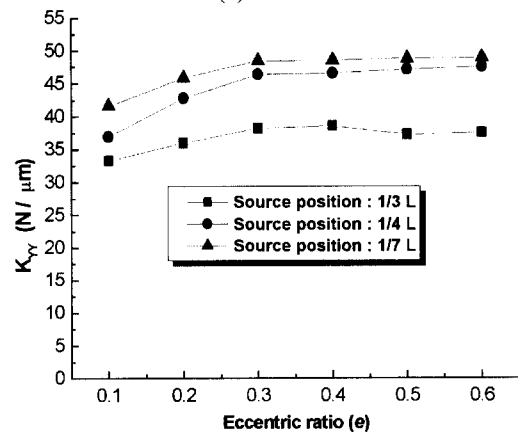
(c) Source position=1/7L

Fig. 8. The characteristics between loading capacity and loading displacements according to rotor speed.

호를 나타내고 있다. 실험 결과 Fig. 6, Fig. 7에서 보면 주절삭력의 증가에 따라서 저어널의 변화량을 표현하였는데, 급기구 위치 1/4L에서의 절삭변위신호가 급기구 위치 1/7L의 변위신호보다 크게 나타남으로써 주절삭력에 대한 변위차이를 보여주고 있다. Fig. 7의 절삭력의 법선 방향(yy방향)의 힘의 증가에 따라 변위 신호는 Fig. 6 보다는 뚜렷하게 현상이 나타나지 않으나 1/4L의 급기구 위치 보다는 1/7L 위치에서 주장성(K_y) 크기가 큼을 보여주고 있는 결과라 할 수 있다. 결국 일반적인 공기 정압 베어링의 설계시 변수로서 급기구의 위치 설계시 1/4L의 급기구 위치 선정은 순수 정적인 압력만 존재하였을 경우 적용이 가능하였으나, 스피들의 회전속도가 높을수록, 그리고 절삭저항에 의한 편심의 변화가 발생할수록 급기구의 위치의



(a) XX Stiffness



(b) YY Stiffness

Fig. 9. Stiffness of direct direction according to the eccentric ratio and source position.

선정에 있어서 HRD 현상에 의한 압력변화가 있음을 고려하여 급기구 위치 선정이 다시 고려하여 설계가 되어져야 함을 입증 하여주고 있다. Fig. 8에서는 급기구의 위치와 저어널의 회전속도를 달리하여 동적계수를 측정하였다. 회전속도가 증가할수록 같은 질삭 저항에도 불구하고 변위의 크기는 줄어들므로서 회전속도 역시 베어링의 하이드로 다이내믹에 의한 영향이 있음을 예측할 수 있다. Fig. 8의 결과는 저어널의 속도가 증가할 수 록 베어링의 간극내에서는 동압효과에 의한 압력의 크기가 증가하고, 동압에 의한 압력증가는 베어링의 강성의 증가의 결과를 가져온다고 사료되어진다.

Fig. 6과 Fig. 7의 실험결과를 질삭력에 의해 변화하는 변위 측정값을 정리하여 편심량에 의해서 발생하는 X 방향과 Y 방향의 주강성방향의 강성값을 급기구의 위치에 따라 표현하면 Fig.9과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 9의 (a)와 (b)의 경향을 분석하면 YY 방향의 주강성 값의 변화차이는 그렇게 크게 달라지지 않으나 주질삭방향의 주강성의 변화, XX 방향의 강성의 변화는 뚜렷한 경향을 보여주고 있다. 결국 저어널의 고속 회전중 베어링의 강성 크기는 급기구 위치 1/4L 보다 1/7L이 현저히 크게 발생하고 있음을 보여 주었다.

4. 결 론

외부 가압형 2열 급기 공기 베어링의 위치에 따른 공기베어링의 유막력 특성을 평가하고 실험을 함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 2열 외부가압 공기 베어링에서 노즐의 위치에 따라 동적계수에 관한 실험을 한 결과 저어널의 고속 영역에서 공기 유막내에서도 HRD 현상발생할 수 있는 가능성을 검증하였고, 이는 베어링 성능에 영향을 미치고 있음을 보여주었다.

2. 베어링의 급기구 위치는 베어링끝단에서 베어링 전체길이의 통상 설계치 1/4L의 위치보다는 1/7위에 선정하는 것이 동적 강성 측면에서 유리함을 실험을 통하여 검증하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. J.W. Powell, B.Sc.(Eng.), Ph.D., Westwind Turbines Ltd., Poole, "The Design and Development of Externally Pressurised Bearings," University of Southampton Gas Bearing Symposium, March-April 1965. Paper 7, pp. 1~16.
2. N.M. Franchek, D.W.Childs, "Experimental Test Results for Four High-Speed, High-Pressure, Orifice-Compensated Hybrid Bearings." ASME Journal of Tribology, Vol.116, January 1994, pp.147-153.
3. J.T.Sawicki, R.J.Capaldi, M.L.Adams, "Experimental and Theoretical Rotordynamic Characteristics of a Hybrid Journal Bearing," Transactions of the ASME, Vol.105, July 1983, pp.422-428.
4. D.P.Fleming, W.J.Thayer, "Experimental dynamic stiffness and damping of externally pressurized gas-lubricated journal bearing," NASA TN D-8270, 1976, pp1-27.
5. D.V.Singh, R.Sinhasan and S.S.Wadhwa, "Dynamic performance of plain gas journal bearing," Tribology international, 1984, Vol.15 pp33-41.
6. 한상욱, 석사학위논문, "외부가압 공기저어널 베어링의 동적계수에 관한 실험적 연구," 한국과학기술원, 1989.
7. 반종익, 석사학위논문 "외부가압기체의 국부조절에 의한 기체베어링의 안정성 향상에 관한 연구," 한국과학기술원, 1989.
8. Z.Kazimierski, L.Brzeski T.Lech "Experimental investigations of precision spinles equipped with high stiffness gas journal bearings," Precision Engineering 23, 1999, pp.155-163.
9. S.Yoshimoto, Y. Anno, Y.Hirakawa, "Aerostatic thrust bearing with a self controlled restrictor employing a floating disk," JSME Int. Vol.37, No 2, 1994, pp.369-375.
10. G.H.Jang, Y.J.Kim, "Calculation of Dynamic Coefficients in a Hydrodynamic Bearing Considering Five Degrees of Freedom for a General Rotor-Bearing System ASME," Journal of Tribology, July 1999, Vol.121, pp.499-505.
11. Klit.p, Lund.J.W, "Calculation of Dynamic Coefficient of Journal Bearing Using a Variational Approach," ASME Journal of Tribology, 1986, Vol. 108, pp.421-425.
12. "정압기체 베어링의 이론" 윤활공학의 기초와 응용- 한국과학기술원- pp.58~65.
13. 이종열, 성승학, 이득우, "2열 외부가압 공기 저어널 베어링에서 급기구 위치에 따른 부하지지 특성에 관한 연구" 한국윤활학회, Vol.17, No.5 October 2001, pp.365-372